

5. Matlab. Simulink-моделирование и симуляция динамических систем для Simulink [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://matlab.ru/products/Simulink> (дата обращения: 11.10.2018).

УДК 004.85/621.3

**А. А. Сираев, В. Ю. Носков**

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

## **РЕАЛИЗАЦИЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОХОЖДЕНИЯ ЗВУКОВЫХ ВОЛН ЧЕРЕЗ СЫПУЧИЕ МАТЕРИАЛЫ**

### **Аннотация**

*Рассмотрена задача определения весовой влажности сыпучих материалов акустическим методом. Экспериментально реализована и исследована установка на основе программируемых микроконтроллеров.*

**Ключевые слова:** микроконтроллеры, определение влажности сыпучего материала, линейные модели машинного обучения.

### **Abstract**

*This article considers the problem of measurement the weight humidity of bulk materials by acoustic method. The device consisting of programmable microcontrollers was developed and tested for this purpose.*

**Key words:** microcontrollers, measurement of the moisture content in bulk materials, machine learning linear models.

### **Введение**

Ультразвуковые волны широко используют в молекулярной акустике для исследования акустическими методами строения и свойств вещества. В частности, разные особенности распространения звуковых волн в жидкостях, твердых телах и газах позволяют использовать звуковые волны для определения влажности сыпучих материалов.

Работа посвящена разработке и исследованию установки на микроконтроллерах в задаче определения влажности. Основными функциями установки являются генерирование и сбор звукового сигнала с частотами 1 - 64 кГц. На основе собранных данных была построена модель определения влажности сыпучих материалов, которая в дальнейшем может быть интегрирована непосредственно в саму установку.

### **1. Реализация и принцип работы установки**

Звуковые волны, при прохождении через породу, влагу и воздух, поглощаются и теряют скорость и энергию. Например, высокочастотный звуковой сигнал сильно поглощается при нулевой влажности и в меньшей степени поглощается в материале с высокой влажностью. Это объясняется тем, что высушенный сыпучий материал представляет собой множество маленьких кусочков этого материала с воздухом, заполняющим пространство между ними

т.е. такой материал – это множество препятствий на пути у звуковых волн, проходя через которые, звуковые волны рассеиваются и теряют свою энергию. В воде же, в отличие от воздуха, скорость распространения звуковых волн больше, вследствие чего больше и их энергия. По мере изменения соотношения влаги, воздуха и твердых фракций в материале будет изменяться его упругость и однородность. Вследствие этого, при передаче акустического сигнала в такой среде от одного пьезоэлемента к другому, скорость и энергия звуковых волн различна [1]. Эти физические свойства жидкости и воздуха можно использовать для определения влажности сыпучих материалов. Для этого нужно пропустить через образец звуковые волны с разными частотами и отследить зависимость характеристик измеренного сигнала от влажности образца. Реализуя описанное, была сконструирована установка.

Установка основана на двух программируемых микроконтроллерах STM32F103C8 и Arduino Pro Mini [2, 3]. Микроконтроллер STM32 с тактовой частотой 72 МГц и с двумя двенадцати битными АЦП, отлично подходит для преследуемых целей. STM32F103C8 является основой стенда и выполняет следующие функции: сбор звукового сигнала посредством пьезоэлемента, чтение времени с часов реального времени DS1307, запись в log-файл собранных данных на sd-карту через модуль LC Studio SD card. Микроконтроллер Arduino Pro Mini (ATmega328, 17 МГц) в свою очередь выполняет функцию генератора сигнала посредством второго пьезоэлемента (рис. 1).

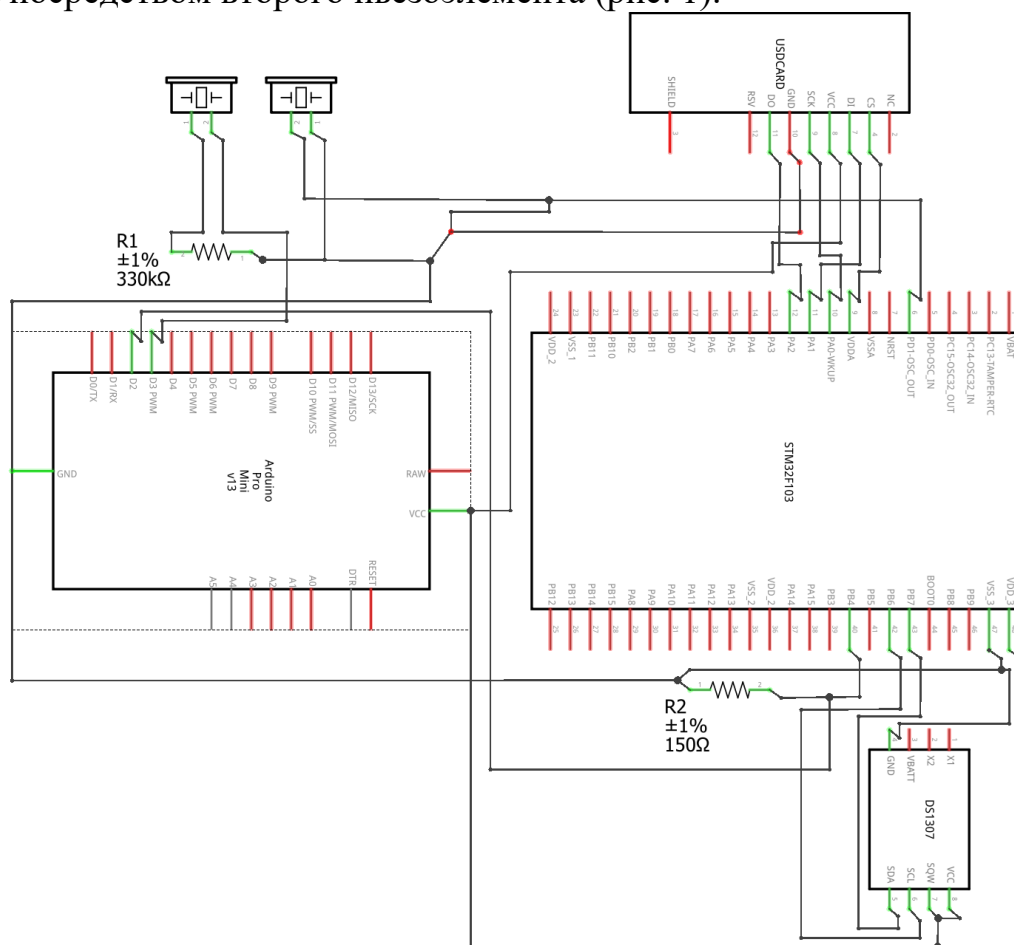


Рис. 1. Принципиальная схема установки

Встроенное ПО микроконтроллера STM32F103C8 запрограммировано при помощи среды разработки Arduino IDE. Это стало возможно благодаря проекту STM32duino [4], где портировали как саму среду разработки, так и большинство библиотек. Программирование микроконтроллеров осуществляется на языке СИ, с последующей компиляцией в код микроконтроллера.

Алгоритм работы стенда: Arduino Pro Mini подает сигнал на дискретный вход STM32F103, после чего STM32F103 переходит в режим готовности принимать и записывать звуковой сигнал. Затем, Arduino Pro Mini, посредством пьезоэлемента, генерирует звуковой сигнал нужной частоты. STM32F103 при помощи часов реального времени считывает текущее время, затем, записав текущее время в файл на sd-карте, считывает значения звукового сигнала с пьезоэлемента и построчно записывает серию значений каждой из частот генерируемого сигнала. В итоге на sd-карте в log-файле содержится 65 строк с временем начала записи в первой строке и с 64 строками значений частот в диапазоне 1- 64 кГц.

## 2. Модель определения влажности

При помощи установки был сформирован небольшой набор измерений (далее, датасет) для образцов сыпучего материала в диапазоне от 0% влажности до 80%. Датасет выглядит следующим образом: для образцов с влажностью 0, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80% имеются значения воздействия звуковых волн на пьезоэлемент в диапазоне частот от 1 кГц до 64 кГц. Одно измерение(семпл) конкретного образца с определенной влажностью выглядит так: для каждой из 64-х частот имеются 400 значений, 200 из которых записывались непосредственно в момент передачи звукового сигнала. Если, предварительно очистив от выбросов, отобразить значения одного из измерений образца с влажностью 0% на графике, то получится следующее (рис. 2):

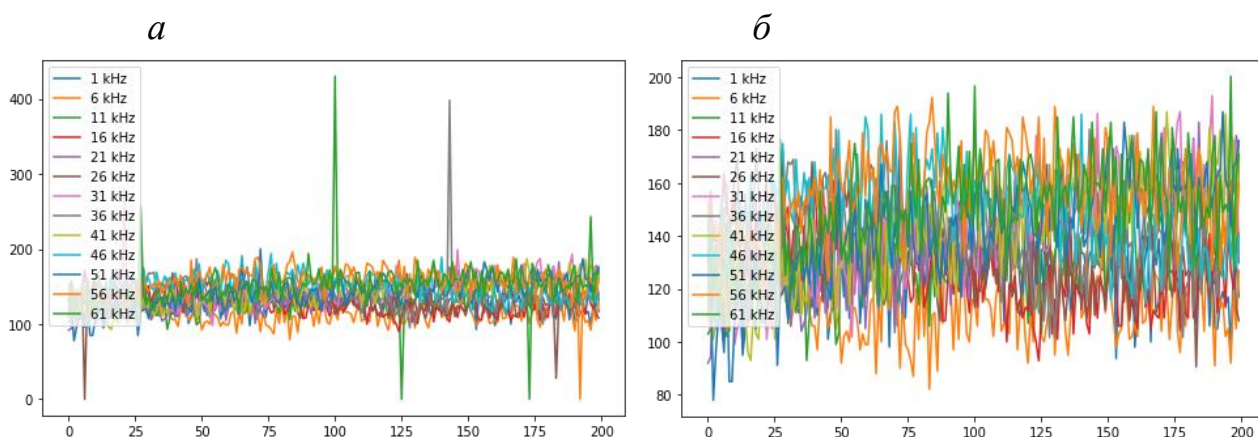


Рис. 2. Измерения каждой пятой частоты земли с влажностью 0 %:  
а – значения с выбросами; б – значения без выбросов

Видно, что в системе практически отсутствует время установления вынужденных колебаний. Если же посмотреть на значения измерений земли с влажностью 80 % (рис. 3), то нетрудно заметить, что время установления

вынужденных колебаний значительно увеличивается. Так же увеличивается разброс по амплитуде установившихся вынужденных колебаний с различной частотой.

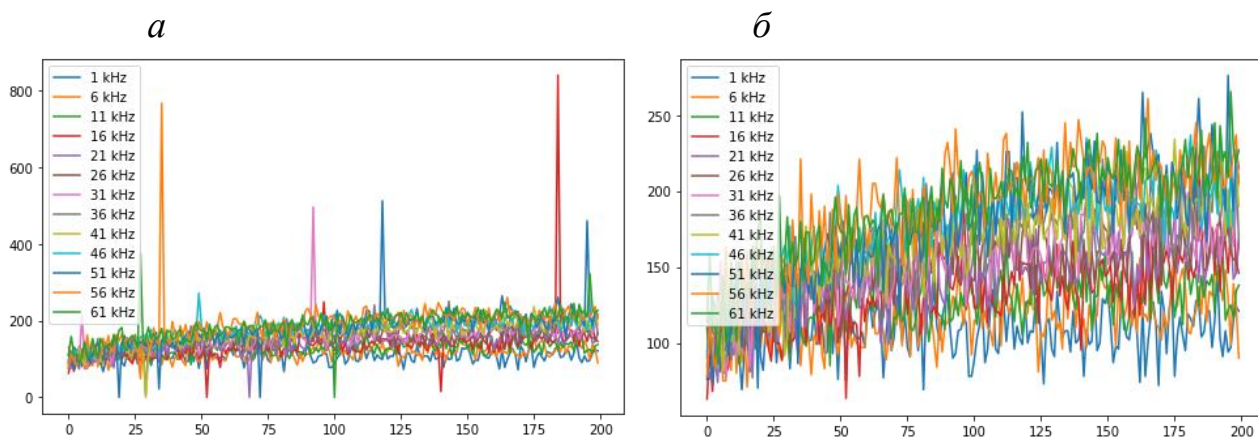


Рис. 3. Измерения каждой пятой частоты земли с влажностью 80 %:  
*а* – значения с выбросами; *б* – значения без выбросов

Используя имеющиеся закономерности, из данных были выделены признаки(регрессоры) для дальнейшего обучения моделей. Признаки строились по следующим образом: значения каждой частоты разбивались на половины, четверти, восьмые части и брались от них средние и медианы. Помимо всего этого был использован алгоритм снижения размерности KernelPCA [5] (метод главных компонент) с разными значениями параметра kernel (linear, poly, rbf) и  $n\_components = 2$  (рис. 4).

Всего было произведено 101 измерение, поэтому датасет выглядит как матрица 101x1606. В качестве предсказательной модели был выбран алгоритм линейной регрессии ElasticNet [6]. Модель была обучена с подобранными оптимальными гиперпараметрами.

### 3. Анализ экспериментов

Для проверки работоспособности, точности, обобщающей способности и поиска оптимальных гиперпараметров модели был использован скользящий контроль (перекрестная проверка или cross-validation). Так же для этого был использован StratifiedKFold из библиотеки sklearn с метрикой качества MSE (среднеквадратичная ошибка). Датасет случайным образом делился на тестовую и обучающую выборку 1:9 с балансировкой классов, далее модель обучалась на обучающей выборке и проверялась на тестовой, такое испытание было проведено 15 раз. Результаты испытаний приведены в таблице.

Как видим модель позволяет производить корректную оценку влажности. Если усреднять показания среднеквадратичной ошибки для 15 испытаний, то получится среднеквадратичная оценка 20,3. Значительную величину среднеквадратичного отклонения рассчитанного значения влажности моделью и измеренного можно объяснить сложностью создания полностью однородного образца для проведения измерений. Как следствие - прохождение звуковых волн могло быть через области более высокой или наоборот более низкой влажности, чем влажность образца в целом. При взаимодействии с прибором по протоколу

Modbus, OPC сервер использует стандартизованные форматы данных. Для получения данных из прибора необходимо знать адреса регистров, хранящих значения конкретных параметров.

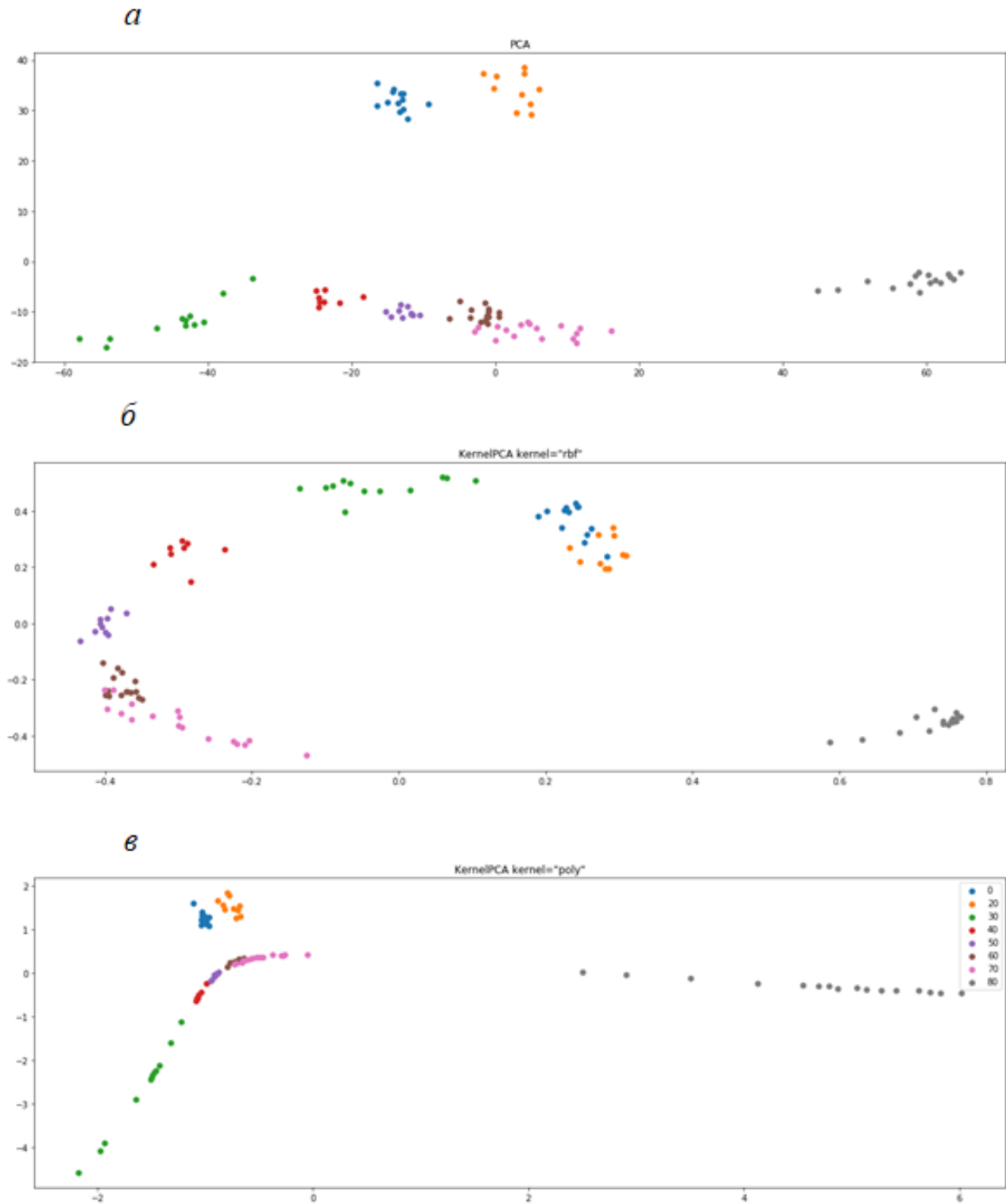


Рис. 4. Представление датасета при помощи метода главных компонент с разным значением параметра kernel: PCA (*a*), rbf (*б*) и poly (*в*)

Предсказания модели для 15-ти контрольных испытаний

Номер испытания, №	Влажность, %								MSE
	0	20	30	40	50	60	70	80	
1	4	19	25	40	53	60	66	84	10,375
2	5	7	31	43	50	54	65	80	33,125
3	3	7	33	41	50	60	66	81	25,625
4	5	7	29	43	50	57	74	80	28,625
5	4	15	29	42	52	61	62	81	14,5
6	2	7	33	41	52	57	72	81	25,125
7	8	15	25	39	52	56	61	82	27,5
8	9	21	28	38	53	61	74	82	15,0
9	3	21	31	40	50	56	64	79	8,0
10	9	9	29	42	49	60	63	81	32,25
11	8	7	28	41	49	61	71	81	30,25
12	2	17	33	41	53	61	70	81	4,25
13	3	7	28	41	50	57	66	81	26,125
14	5	19	31	37	52	56	64	80	11,5
15	3	14	32	44	52	56	66	79	12,75
MSE	29,4	82,3	6,6	4,1	3,3	8,7	26,1	2,2	

#### 4. Заключение

Была сконструирована установка для генерирования и сбора значений звуковых волн разных частот. Установка состоит из двух микроконтроллеров (STM32F103C и Arduino Pro Mini), кардридера, часов реального времени SD1307 и двух пьезоэлементов. Установка позволила проверить пригодность методики для исследования показаний влажности. Однако, для повышения точности измерений, ее необходимо модернизировать в сторону улучшения точности снимаемых показаний, компактности и мобильности.

Проведенные эксперименты показали наличие зависимости между влажностью образца и характеристиками прохождения звукового сигнала через образец. На основе этой зависимости была обучена линейная модель машинного обучения ElasticNet.

На контрольных образцах модель показала довольно неплохой результат, хотя стоит отметить, что обученная модель сильно зависит от условий, в которых формировался датасет, что накладывает ограничения на обобщающую способность модели. Стоит отметить, что для повышения точности определения влажности можно сформировать больший датасет или же в качестве предсказательной модели может быть использован алгоритм искусственных нейронных сетей, которые, в силу сложности, довольно сильно ограничены в использовании их в микроконтроллерах.

Использованный в данной работе подход, может использоваться для разных физических характеристик материалов, с условием что должна сохраняться зависимость физических характеристик и измеряемого параметра.

Код Arduino скетчей и jupyternotebook файл обработки данных и обучения модели доступны в GitHub репозитории [7].

### Список использованных источников

1. Радзишевский А.Ю. Основы аналогового и цифрового звука. – М.: Вильямс, 2006. – 288 с.
2. Микроконтроллер STM32F103C8 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f103c8.html>.
3. Микроконтроллер Arduino Pro mini [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-pro-mini>.
4. Arduino for STM32 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.stm32duino.com>.
5. Schoelkopf B., Smola A.J., Mueller K.-R. Kernel principal component analysis. In Advances in kernel methods // MIT Press. Cambridge. MA. USA. 1999. Pp. 327-352.
6. Zou H, Hastie T. Regularization and variable selection via the Elastic Net // Journal of the Royal Statistical Society. 2005. Series B. V.67. Pp. 301-320.
7. GitHub репозиторий [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://github.com/aisiaz/stm32duinoHumidityProjectData>.

УДК 004.94

**Д. А. Чащина, А. А. Першин**

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

### РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-МОДЕЛИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ПО РАСЧЕТУ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА АНОДНОЙ ПЕЧИ

#### Аннотация

*Представлено описание информационно-моделирующей системы, основной функцией которой является расчет теплового баланса анодной печи. Основными входными данными системы являются: химическое тепло горения топлива и неполного горения газа, физическое тепло подогретого воздуха и экзотермических реакций, полезное тепло, тепло со шлаком, потери тепла в окружающее пространство, потери с дымовыми газами и с охлаждающей водой. Отражены основные этапы разработки программного обеспечения: постановка задачи, реализация тестового варианта расчета и проверки методики расчета в электронных таблицах Microsoft Excel; разработка архитектуры информационной системы; проектирование, реализация программного средства (математической библиотеки и пользовательского интерфейса); обработка исключительных ситуаций в программе; разработка системы автоматизированного тестирования для проверки корректности расчетов; создание справочной документации; подготовка дистрибутива; формирование отчета с результатами расчета с возможностью его предварительного просмотра и экспорта во внешние форматы.*